مقایسه آماری عمر خستگی فولاد Ck45 آهنگری‌شده در شرایط نرماله، کوئنچ و تمپرشده با شرایط کوئنچ و تمپرشده*

احد ضابط[۱] حسین حیدری[۲] جواد برادران[۳]

چکیده

در فرآیند تولید، نرمال کردن معمولاً پس از عملیات آهنگری و قبل از عملیات کوئنچ و تمپر بر روی قطعات صنعتی انجام می‌شود. این عملیات موجب یکنواخت و ریز شدن ریزساختار می‌گردد. با توجه به تأثیر کم عملیات نرماله بر خواص مکانیکی فولاد Ck45 آهنگری، کوئنچ و تمپرشده و ضرورت کاهش هزینه‌های تولید، حذف این عملیات پس از آهنگری مطلوب به نظر می‌رسد. نتایج بررسی‌های ریزساختاری، سختی‌سنجی و آزمایش کشش، تأثیر بسیار کم عملیات نرماله را بر خواص یاد شده تأیید می‌نمایند. لکن خواص خستگی از اهمیت بالائی برخودار می‌باشد که موضوع اصلی این تحقیق است. عمر خستگی قطعات در حالت آهنگری، کوئنچ و تمپرشده و حالت آهنگری، نرماله، کوئنچ و تمپرشده مورد بررسی قرار گرفت. تعداد ٦٤ آزمون خستگی خمشی دورانی (R=-1) در چهار دامنه تنش مختلف انجام شد. این آزمایشات در تنش‌های متوسط به بالا، ۰/۵۹ تا ۰/٦۸ برابر استحکام کششی، انجام شد. متوسط عمر نمونه‌های نرماله، کوئنچ و تمپرشده در دامنه تنش‌های ۵۰۸، ۵۱٦، ۵۳٤ و ۵۸۳ مگاپاسکال به ترتیب برابر با ٢٦١هزار، ۱۹٤هزار، ۱۱۹هزار و ۵٤هزار سیکل و متوسط عمر نمونه‌های کوئنچ و تمپرشده در تنش‌های یاد شده به ترتیب برابر با ۲۰۹هزار، ۱۳۸هزار، ۱۰۱هزار و ٤٦هزار سیکل بود. مقایسه نتایج در هر دامنه تنش نشان دهنده متوسط عمر بیشتر نمونه‌های نرمال شده می‌باشد لکن به خاطر تعداد محدود نمونه‌ها در هر سطح تنش آزمون واریانس، اختلاف معنی‌داری را میان عمر خستگی در دو حالت عملیات حرارتی تأیید نمی‌نماید. در واقع توان آزمون آماری در تشخیص اختلاف بین متوسط طول عمر کم است. از این رو، نویسندگان مقاله روشی را برای هم‌ارزسازی نتایج چهار سطح تنش پیشنهاد نموده و پس از هم‌ارز نمودن، تمام نتایج را در یک آزمون میانگین با واریانس نامعلوم و توان بیشتر مقایسه کردند. نتیجهٔ آزمون واریانس در این حالت حاکی از اختلاف میانگین دو جامعه در سطح معنی دار ۵٪ بوده و عمر متوسط خستگی قطعات نرمال شده حداقل ۱۸٪ بیش‌تر از عمر قطعات نرمال نشده تخمین زده می‌شود.

واژه‌های کلیدی عمرخستگی، فولادکم‌کربن آهنگری‌شده، عملیات نرماله، بررسی آماری.

Statistical Comparison of Fatigue Lives of Forged Ck45 Steel in Normalized, Quenched and Tempered Condition with Those in Quenched and Tempered Condition

A. Zabett H. Heidari J. Baradaran

Abstract

*A common process in auto-parts manufacturing consists of forging, normalizing, quenching and tempering. Normalizing treatment is usually employed to improve machinability of steel, and to homogenize and refine the microstructure. For simple parts, production cost would be reduced if normalizing stage were eliminated. In this paper, the effect of normalizing treatment on fatigue life of a quenched and tempered carbon steel has been studied. Samples were taken from forged, quenched and tempered parts at industrial conditions. Sixty four fatigue specimens were tested using a rotary bending fatigue machine (R=-1) at four different stress amplitudes between 500 and 600MPa. Results showed minor effect of normalizing on microstructure, hardness and tensile properties. However, specimens normalized after forging indicated improved fatigue life at the same stress amplitude. Average fatigue lives at 508, 516, 534 and 583MPa were 261000, 194000, 119000 and 54000 cycles respectively for normalized quenched and tempered samples and 209000, 138000, 101000 and 46000 cycles for quenched and tempered samples. Due to variation of fatigue life results, Student's **t**-test was employed to prove any meaningful difference of fatigue life for specimens with or without normalizing treatment. Student's **t**-test is often used to determine if the averages of two samples are significantly different. The test approved the difference with 95% confidence. Fatigue life of normalized samples was estimated at least 18% higher than the life of samples without normalizing.*

Key Words Fatigue Life, Heat Treatment, Normalizing and Carbon Steel.

---

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۸۷/٦/۳۱ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۸۸/۱۲/٢٤ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) عهده‌دار مکاتبات : استادیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

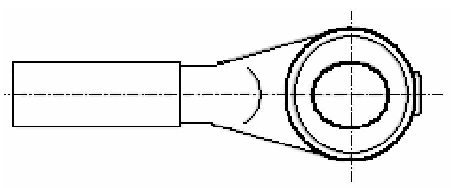
(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

در صنعت قطعه سازی، در فرآیند تولید قطعات فولادی آهنگری و عملیات حرارتی شده معمولاً قبل از مراحل کوئنچ و تمپر، عملیات نرمال کردن بر روی قطعات انجام می‌شود. این عملیات بیشتر به منظور ریز و یکنواخت‌کردن فولاد بعد از آهنگری انجام شود. لیکن در مواردی که قطعه باید ماشین‌کاری می‌شود، برای کاهش هزینه‌های ماشین‌کاری و همچنین حذف تنش‌های پس‌ماند و پیش‌گیری از اعوجاج قطعه، عملیات نرمال کردن قبل از کوئنچ و تمپر انجام می‌شود. در قطعاتی که نیازبه ماشین‌کاری ندارند یا شکل قطعه پیچیدگی زیادی که منجر به اعوجاج یا ترک برداشتن آن شود نداشته باشد، امکان حذف عملیات نرمال کردن وجود دارد[1-4]. لکن با توجه به اهمیت اثر یکنواختی ساختار بر خواص دینامیکی قطعه، اثر عملیات نرمال کردن بر خواص خستگی قطعات مورد سئوال است. هدف این تحقیق بررسی امکان حذف مرحله نرمال‌کردن در فرآیند آهنگری، نرماله، کوئنچ و تمپر قطعات تولیدشده از جنس فولاد ساده‌کربنی می‌باشد.

قطعه انتخاب شده برای این تحقیق سیبک فرمان از سیستم تعلیق خودرو از جنس فولاد Ck45 می‌باشد، (شکل ۱). چون این قطعه قبل از کوئنچ و تمپر کردن ماشین‌کاری نمی‌شود، نرمال کردن ریزساختار ضرورتی ندارد. از طرفی قطعه دارای شکل پیچیده‌ای نبوده و مشکل اعواج و تنش‌های پسماند نیز وجود ندارد. لکن در فرآیند معمول تولید قطعه عملیات نرماله پس از آهنگری و قبل از کوئنچ وجود دارد که می‌تواند به منظور ریزکردن دانه‌بندی و بهبود خواص مکانیکی بوده باشد. در این تحقیق ضمن بررسی ریزساختاری و خواص مکانیکی از جمله سختی و خواص کششی، عمر خستگی در تنش‌های مختلف تعیین و مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمون خستگی در شرایط مختلف عملیات حرارتی، در خصوص اثر حذف عملیات نرماله از فرآیند تولید قطعه سیبک فرمان بحث خواهد شد.



شکل ۱ تصویر شماتیک سیبک فرمان

بسیاری از محققان اثر ریزساختار را بر رفتار خستگی فولادهای کم کربن بررسی کرده‌اند[5-10]. توزیع فازهای اصلی تشکیل دهنده تأثیر به سزائی در شروع ترک و اشاعه آن دارد. این موضوع توسط تعدادی از محققان در فولادهای ساده کربنی به خوبی نشان داده شده است[7,8]. شروع ترک در فاز فریت و اشاعه ترجیحی ترک در این فاز تأیید شده است. De Los Rios و همکاران[9] و Zettl و همکاران [10] اثر مورفولوژی فریت بر شروع و اشاعه ترک را بررسی نموده و نشان داده‌اند که شروع ترک در فریت درشت در تنش‌های کمتر اتفاق افتاده و تعداد ترک‌ها در فریت درشت بیشتر از تعداد ترک‌ها در فریت ریز است.

نتایج آزمایش‌های خستگی معمولاً دارای پراکندگی و تغییرات زیادی هستند[11,12]. از این رو، کسب اطمینان از اختلاف عمر متوسط قطعات در دو حالت عملیات حرارتی مختلف نیاز به بررسی آماری دارد. در مواقعی که نیاز است بین دو جامعه به صورت آماری مقایسه انجام شود و یا این‌که لازم باشد یک فرضیه به صورت آماری مورد امتحان قرار گیرد، بررسی‌ها و نتیجه‌گیری‌های آماری معمولاً منجر به ارائه فرضیه‌های آماری می‌شوند[13]. در مورد درستی یا نادرستی یک فرضیه آماری هرگز نمی‌توان اظهارنظر قطعی نمود مگر آن‌که تمام جامعه امتحان شود و این‌کار معمولاً غیرعملی است، امّا می‌توان یک نمونه تصادفی از جامعه را انتخاب نموده و با استفاده از آن درمورد قبول یا رد فرضیه تصمیم گرفت. برای این‌کار از آزمون فرضیه‌های آماری استفاده می‌شود. در مسئله

آزمون فرضیه(Hypothesis Testing) معمولاً یک ادعـا در قالب فرضیه مخالف و خلاف آن در قالـب فرضـیه صفر بیان می‌شود. در صورتی که بر اساس نمونه دلیلی برای رد فرضیه صفر وجود نداشته باشد، آن را پذیرفته و ادعا رد می‌شود. آزمون فرضـیه درمـوارد مختلفـی از جمله مقایسه میانگین دو یا چند جامعه کاربرد دارد. در مقایـسه نتـایج آزمـون خـستگی در شـرایط مختلـف عملیات حرارتی، با توجه به پراکندگی نتایج، مـی‌تـوان از آزمون مقایسه دوجامعه (آزمـون t) (Student t-test) استفاده نمود. با استفاده از این روش آمـاری تـشخیص داده می‌شود که آیا تمام داده‌ها متعلـق بـه یـک جامعـه آماری هستند یـا ایـن‌کـه بـه دو جامعـه آمـاری بـا دو میانگین متفاوت تعلق دارند.

روش تحقیق

برای تولید سیبک فرمان، قطعاتی به طول ۲۵سانتی‌متـر از میل‌گـرد فـولاد Ck45 بـاقطر ۳۸ میلیمتـر بـرش‌زده می‌شوند. ترکیب شیمیائی فـولاد در جـدول (۱) آورده شده است. قطعات در یک کوره القایی تا دمـای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده و در دو مرحله توسـط پرس ۱۰۰۰ تن و پرس ۱۶۰۰ تن آهنگری می‌شوند.

سپس عملیات حرارتی نرماله، آستنیته، کوئنچ و تمپر بر روی قطعات انجام مـی‌شـود. بـرای انجـام آزمایـشات تعداد ۱۲۰ نمونـه از قطعـات آهنگـری شـده بـه طـور تصادفی انتخاب شدند. ٦۰ نمونه تحت عملیات نرمالـه قرار گرفتند و ٦۰ نمونه نرماله نـشدند. در ایـن مرحلـه بـر روی همگـی ۱۲۰ نمونـه طبـق روال معمـول بقیـه فرآیند یعنی عملیات آستنیته، کوئنچ و تمپر اعمال شـد. عملیات نرماله به مدت ۱۳۰ دقیقه در دمای ۸۹۰ درجه سانتی‌گراد انجام شـد و سـپس قطعـات در هـوای آرام سرد شدند. مرحله آستنیته کردن به مدت ۱۰۰ دقیقـه در دمای ۸۹۰ درجه سـانتی‌گـراد انجـام شـد و قطعـات در حمام روغن متلاطم کوئنچ شدند. عملیات تمپر در دمای ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۵ دقیقه انجام گردید.

قطعات طبق جدول (۲) نام‌گذاری شده و سختی تمام نمونه‌هـا در مقیـاس راکـولA انـدازه‌گیـری شـد. بررسی‌های ریزساختاری برای تمام مراحل نمونـه‌هـای جدول (۲) انجام شد. نمونه‌های آزمون کـشش از مغـز قطعات مطابق استاندارد ASTM E8M تهیه شدند و دو نمونه QT و دو نمونه NQT تحت آزمایش کشش قرار گرفتند.

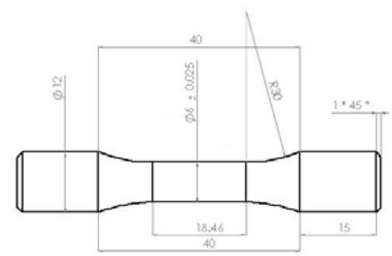
جدول ۱ ترکیب شیمیائی فولاد Ck45

عناصرشیمیایی	Mo	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C
درصد وزنی	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۶۴	۰/۲۲	۰/۴۴

جدول ۲ نام گذاری نمونه ها

نمونه	کد
نمونه خام	AR
نمونه آهنگری شده قبل عملیات حرارتی	AF
نمونه آهنگری نرمال شده	N
نمونه آهنگری، نرماله و کوئنچ شده	NQ
نمونه آهنگری و کوئنچ شده	Q
نمونه آهنگری، نرماله، کوئنچ و تمپر شده	NQT
نمونه آهنگری، کوئنچ و تمپر شده	QT

نمونه‌های آزمون خستگی نیز از مغز قطعات، طبق نقشه شکل (۲) با ماشین‌تراشکاری CNC تهیه شدند. نمونه‌های خستگی پس از سمباده‌زنی با شماره‌های ۴۰۰، ٦۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ با خمیر الماس ۱ میکرون پولیش شدند. پولیش نهائی به منظور بررسی‌های میکروسکوپی سطح نمونه‌ها بعد از آزمون خستگی انجام شد. برای آزمایشات خستگی از دستگاه خستگی خمشی- دورانی Zwick/Roel مدل UBM200 استفاده شد.



شکل ۲ نمونه شماتیک آزمون خستگی

نتایج و بحث

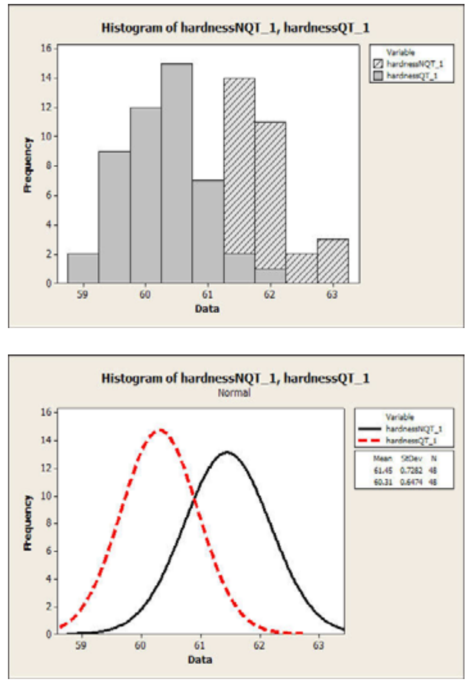
مقادیر سختی پس از هر مرحله عملیات حرارتی در جدول (۳) آورده شده‌اند. سختی‌سنجی هر قطعه در ۵ نقطه انجام شده است. این نتایج نشان‌دهنده سختی‌پذیری کم فولاد و عدم مارتنزیتی شدن کامل نمونه‌ها بعد از کوئنچ می‌باشد. اختلاف سختی نمونه‌ها بین حالت‌های Q و NQ و نیز بین حالت‌های QT و NQT بسیار کم می‌باشد. برای مقایسه سختی حالت‌های QT و NQT با توجه به تعداد کافی نمونه‌های سختی سنجی شده (٩٦ نمونه) آزمون t برای مقایسه میانگین دو جامعه انجام شد که نتیجه در شکل (۳) و جدول (٤) آورده شده است. اختلاف میانگین این دو جامعه با اطمینان بسیار بالا معادل ۱/۱٤ راکول A تخمین زده می‌شود. نتیجه این آزمون قبول فرضیه اختلاف سختی بین این دو حالت عملیاتی در سطح ۵٪ می‌باشد. هر چند که اختلاف میانگین سختی دو روش عملیات حرارتی قطعی است، در عین حال میزان این اختلاف چندان قابل توجه نبوده و از نظر خواص مکانیکی کم اهمیت می‌باشد.

برای هر حالت عملیات حرارتی QT و NQT دو آزمایش کشش انجام شده و متوسط نتایج خواص کششی در جدول (۵) گزارش شده است. خواص کششی نمونه‌ها کاملاً مشابه بوده و نشان می‌دهد عملیات نرماله اثر محسوسی بر خواص کششی نمونه‌های کوئنچ و تمپرشده نداشته است.

متالوگرافی نمونه‌های کوئنچ شده در حالت‌های Q و NQ حاکی از مقادیر بسیار ناچیز مارتنزیت در نمونه‌ها می‌باشد که به خاطر ضخامت قطعه و کوئنچ در روغن در شرایط صنعتی است. شکل (٤) تصویر متالوگرافی نمونه‌های QT و NQT را در بزرگنمائی یکسان نمایش می‌دهد. این تصویر نشان دهنده ساختار فریت و پرلیتی هر دو نمونه می‌باشد. تفاوت دو ریزساختار در میزان فریت، شکل و نحوه توزیع آن می‌باشد. در نمونه‌های QT به میزان ناچیزی فریت بیشتر و پراکنده‌تر مشاهده می‌شود. که این اخلاف ناچیز با اختلاف سختی مشاهده شده همخوانی دارد.

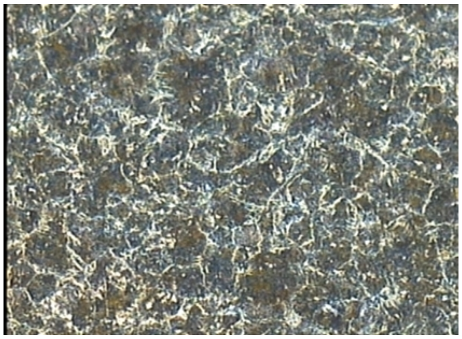
جدول۳ نتایج سختی سنجی نمونه ها پس از هر مرحله عملیات حرارتی

حالت عملیات حرارتی	AR	AF	N	Q	NQ	QT	NQT
متوسط سختی HRA	۵۸/۰۵	۵۸/٤۵	٤۵/۷	٦۲/۹۲	٦۲/۲۲	٦۰/۳۱	٦۱/٤۵
تعداد نمونه	۳	۳	۳	۳	۳	٦۰	٦۰

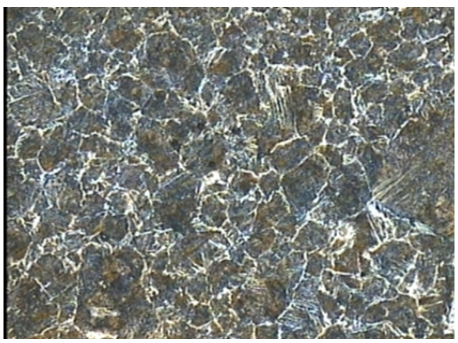


شکل ۳ هیستوگرام سختی نمونه‌های QT و NQT

QT



NQT



شکل ٤ تصویر متالوگرافی نمونه‌های کوئنچ‌تمپرشده(بالا)، نرماله کوئنچ تمپرشده (پایین).

جدول ٤ نتایج آزمون سختی سنجی دو جامعه

Two-Sample T-Test and CI: hardness NQT, hardness QT

	N	Mean	StDev	SE Mean
Hardness NQT	48	61.452	0.728	0.11
Hardness QT	48	60.308	0.647	0.093

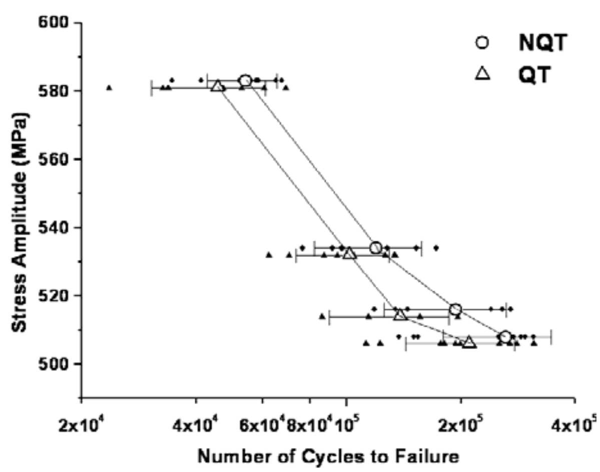
Difference = mu (hardnessNQT_1) - mu (hardnessQT_1)
Estimate for difference: 1.14375
95% CI for difference: (0.86445, 1.42305)
T-Test of difference = 0 (vs not =): **T-Value =** 8.13 **P-Value =** 0.000 **DF =** 92

جدول ۵ خواص کششی نمونه ها در شرایط QT و NQT

عملیات حرارتی	تنش تسلیم N/mm2	استحکام کششی N/mm^2	ازدیاد طول ٪
QT	۵۸۱	۸۵۶	۱۷/۲۱
NQT	۵۸۶	۸۴۷	۱۶/۹۵

نتایج آزمایشات خستگی برای همهٔ حالت‌های آزمایش شده در جدول (٦) آورده شده است. شکل (۵) منحنی S/N را نمایش می‌دهد. لازم به توضیح است کـه دامنـه تنش در آزمایشات برای نمونه‌هـای QT و NQT برابـر بوده و اختلاف سطح نتـایج خـستگی در هـر تـنش در شکل(۵) بـرای تمـایز نتـایج نمونـه‌هـای QT و NQT می‌باشد.

در شکل (۵) تفاوت طول عمر نمونه‌هـای QT و NQT در هر چهـار سـطح تـنش آزمـایش شـده قابـل ملاحظه می‌باشد. همانطور که ذکر شد اطمینـان از ایـن اختلاف نیاز به بررسی آمـاری دارد. چنانچـه اخـتلاف نتایج در هر یک از تنش‌ها را مورد بررسی قـرار دهـیم بـه خـاطر پراکنـدگی زیـاد نتـایج و تعـداد محـدود آزمایـشات، اطمینـان لازم در خـصوص عمـر کمتـر نمونه‌های QT حاصل نمی‌شود و از این رو، استفاده از آزمون مقایـسه میـانگین دو جامعـه ضـروری بـه نظـر می‌رسد. برای این کار ابتدا آزمون نرمال بودن برای هر گروه از داده‌ها انجام شده و با توجـه بـه نرمـال بـودن توزیع، آزمون مقایسه دو میانگین انجام گرفـت. نتـایج این آزمون برای عمر خستگی نمونه‌هـای QT و NQT در تـنش‌هـای ۵۸۱، ۵۳٤، ٥١٦ و ۵۰۸ مگاپاسـکال در جـدول (۷) خلاصـه شـده اسـت. ایـن نتـایج فرضـیه اخـتلاف میـان میـانگین دو جامعـه را در هـر یـک از سطوح تنش قبول نمی‌نماید.



شکل ۵ نمودار S-N قطعات در دو حالت QT و NQT

جدول ٦ نتایج آزمون خستگی

انحراف معیار	میانگین طول عمر (سیکل)	تعداد آزمایش	تنش اعمالی (MPa)	شرایط عملیات حرارتی
15181	45635	8	583	QT
27881	101399	8	534	QT
48125	137837	4	516	QT
66702	209664	10	508	QT
11184	54018	8	583	NQT
37531	119552	6	534	NQT
68817	194089	6	516	NQT
82885	261885	14	508	NQT

جدول ۷ خلاصه نتایج آزمون دو جامعه

Stress Amplitude	T-test Results
583 MPa	Estimate for difference: 8383.75 95% CI for difference: (-6141.46, 22908.96) T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1.26 P-Value = 0.232 DF = 12
534 MPa	Estimate for difference: 18152.8 95% CI for difference: (-23860.3, 60165.9) T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1.00 P-Value = 0.348 DF = 8
516 MPa	Estimate for difference: 56252.2 95% CI for difference: (-31216.1, 143720.4) T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1.52 P-Value = 0.172 DF = 7
508 MPa	Estimate for difference: -52220.5 95% CI for difference: (-115831.0, 11390.0) T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1.71 P-Value = 0.103 DF = 21

بدیهی است برای افزایش توان آزمون اختلاف متوسط عمر دو جامعه QT و NQT باید تعداد آزمایشات بیشتری انجام شود. با دقت در شکل (۵) مشاهده می‌شود متوسط عمر نمونه‌های QT در هر چهار تنش کمتر از متوسط عمر نمونه‌های NQT می‌باشد. لذا با توجه به هزینه‌بر و وقت‌گیر بودن آزمایشات خستگی، نویسندگان روشی را برای هم‌ارزسازی نتایج عمر خستگی در چهار سطح تنش پیشنهاد نموده‌اند، تا تمامی نتایج در یک آزمون مقایسه میانگین دو جامعه قابل استفاده باشند.

برای هم‌ارز نمودن عمر نمونه‌های خستگی در تنش‌های مختلف، عمر نمونه‌های آزمایش شده در تنش‌های ۵۳٤، ۵۱٦ و ۵۰۸ مگاپاسکال با نسبت متوسط عمرشان به متوسط عمر نمونه‌های آزمایش شده در تنش ۵۸۳ مگاپاسکال وزن داده شدند. به عبارت دیگر، عمر نمونه‌ها در تنش۵۸۳ مگاپاسکال مبنا گرفته شده و با تقسیم عمر مبنا بر متوسط عمر نمونه‌ها در تنش‌های ۵۳٤ ، ۵۱٦ و ۵۰۸ مگاپاسکال نسبت R برای هم‌ارز کردن عمر نمونه‌های آزمایش شده به دست آمده است. عمر هم ارزشده از حاصل‌ضرب نسبت R در عمر هر نمونه به دست می‌آید. بدین ترتیب عمر تمام نمونه‌ها با عمر نمونه‌های آزمایش شده در تنش ۵۸۳ مگاپاسکال هم ارز و قابل مقایسه می‌شوند. نسبت R و عمر هم‌ارز شده به ترتیب زیر به دست می‌آیند.

$$\left(R_{\sigma_a}\right)_{NQT} = \left(\frac{\overline{N_{583}}}{\overline{N_{534}}}\right)_{NQT}$$

$$N_{\text{هم ارز شده}} = R_{\sigma_a} \times N_{\sigma_a}$$

به عنوان مثال برای نمونه‌های NQT متوسط عمر در تنش ۵۸۳ مگاپاسکال ۵٤۰۱۸ سیکل و متوسط عمر در تنش ۵۳٤ مگاپاسکال ۱۱۹۵۵۲ سیکل است. لذا (R534(NQT نسبت متوسط عمر در ۵۸۳ مگاپاسکال به متوسط عمر در ۵۳٤ مگاپاسکال خواهد بود.

(R534)NQT=(٥٤٠١٨)/(١١٩٥٥٢)=٠/٤٥٢

نسبت‌های R برای عمر متوسط نمونه‌های تست شده در تنش‌های ۵۳٤، ۵۱٦ و ۵۰۸ مگاپاسکال در شرایط NQT و QT به ترتیب زیر محاسبه شده‌اند.

$$\left(R_{534}\right)_{NQT} = \left(\frac{\overline{N_{583}}}{\overline{N_{534}}}\right)_{NQT} = 0.452$$

$$\left(R_{534}\right)_{QT} = \left(\frac{\overline{N_{583}}}{\overline{N_{534}}}\right)_{QT} = 0.450$$

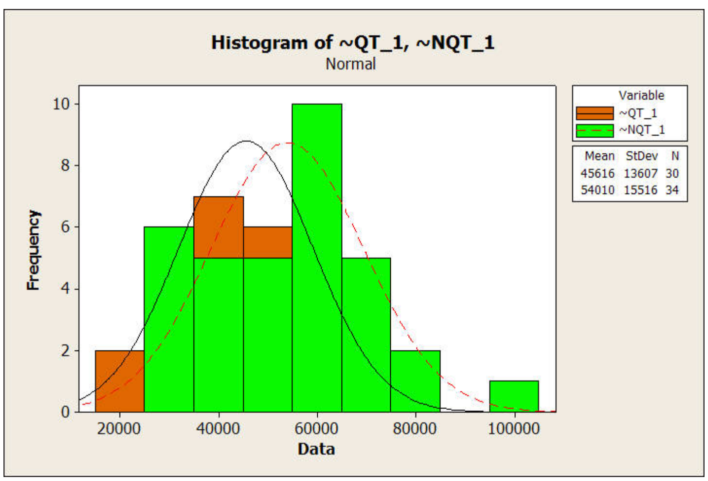
$$\left(R_{516}\right)_{NQT} = \left(\frac{\overline{N_{583}}}{\overline{N_{516}}}\right)_{NQT} = 0.278$$

$$(R_{516})_{QT} = \left(\frac{\overline{N_{583}}}{\overline{N_{516}}}\right)_{QT} = 0.331$$

$$(R_{508})_{NQT} = \left(\frac{\overline{N_{583}}}{\overline{N_{508}}}\right)_{NQT} = 0.218$$

$$(R_{508})_{QT} = \left(\frac{\overline{N_{583}}}{\overline{N_{508}}}\right)_{QT} = 0.218$$

پس از هم‌ارز کردن داده‌ها، اندازه نمونه‌های آماری NQT برابر با ٣٤ و QT برابر با ٣٠ می‌باشد. نتایج آزمون مقایسه میانگین دو جامعه برای داده‌های هم‌ارزشده که پس از آزمون نرمال انجام شده است، در شکل (٦) دیده می‌شود. همانطور که نتایج آزمون نشان می‌دهد، نتایج آزمون خستگی نمونه‌های NQT و QT مربوط به دو جامعه آماری با اطمینان بیش از ٩٥٪ متفاوت می‌باشند. با توجه به نتایج آزمایشات خستگی، متوسط عمر قطعات نرمال شده NQT، ١٨/٤٪ بیشتر از قطعات نرمال نشده QT در تنش ٥٨٣ و برای تنش‌های ٥٣٤، ٥١٦ و ٥٠٨ مگاپاسکال به ترتیب١٨٪، ٤١٪ و ٢٥٪ بیشتر تخمین زده می‌شوند. این نتیجه در حالی به دست آمده است که نتایج بررسی‌های متالوگرافی، سختی سنجی و خواص کششی اختلاف بسیار ناچیزی را نشان داده‌اند. این موضوع اهمیت عملیات نرمال کردن را پس از عملیات آهنگری در قطعات صنعتی که در معرض آسیب خستگی می‌باشند، نشان می‌دهد. با توجه به بررسی‌های اولیه و پیشینه موضوع[9,10] علت این تفاوت، به فریت بیشتر و پراکندگی بیشتر آن در نمونه‌ها نرمال نشده مربوط می‌شود. لکن تعیین دقیق علت این تفاوت مستلزم بررسی‌های بیشتر شکست‌نگاری و ریزساختاری می‌باشد که توسط نویسندگان مقاله در دست بررسی می‌باشد.



شکل ۶ نتایج آزمون میانگین دو جامعه برای داده‌های هم‌ارزشده

جدول ٨ نتایج آزمون دو جامعه برای داده‌های هم‌ارز شده

Two-Sample T-Test and CI: QT_normalized, NQT_normalized

	N	Mean	StDev	SE Mean
~QT_1	30	45616	13607	2484
~NQT_1	34	54010	15516	2661

Estimate for difference: -8393.37
95% CI for difference: (-15672.67, -1114.07)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -2.31 P-Value = 0.025 DF = 61

خلاصه و نتیجه‌گیری

عمر خستگی قطعات آهنگری، کوئنچ و تمپرشده با عمر خستگی قطعات آهنگری، نرماله، کوئنچ و تمپرشده در چهار دامنه تنش متفاوت مقایسه شد. علی رغم اختلاف ناچیز سختی و خواص کششی نمونه‌ها در دو حالت عملیات حرارتی، اختلاف عمر خستگی در چهار دامنه تنش مشاهده شد. با توجه به پراکندگی ذاتی نتایج آزمون خستگی و ضرورت بررسی آماری، از آزمون مقایسهٔ میانگین دو جامعه استفاده شد. برای حصول اطمینان از اختلاف آماری دو جامعه تعداد بیشتری نمونه مورد نیاز بود که با هم‌ارزسازی داده‌های چهار دامنه تنش این امر میسر شد. نتایج آزمون میانگین دو جامعه نشان‌دهنده اختلاف عمر خستگی قطعات آهنگری، کوئنچ و تمپرشده با عملیات نرماله و بدون عملیات نرماله می‌باشد. متوسط عمرقطعات نرمال شده حداقل ۱۸٪ بیشتر از عمر قطعات نرماله تخمین زده می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را نسبت به طرح اینترنشیپ، شرکت ساپکو و شرکت آهنگری پارت‌سازان که شرایط انجام این تحقیق را فراهم آورند اعلام می‌دارند. نظرات ارزنده جناب آقای دکتر دوست‌پرست در خصوص تحلیل آماری موجب تقدیر و تشکر می‌باشد.

مراجع

1. ASM Metals handbook, *Properties and selection: Irons, steels and high-performance alloys*, ASM International Publication, Vol. 1., (1990).
2. ASM Metals handbook, *Failure analysis and prevention*, ASM International Publication, Vol. 11, (1986).
3. ASM Metals handbook, *Fractography*, ASM International Publication, Vol. 12, (1987).
4. ASM Metals handbook, *Fatigue and Fracture*, ASM International Publication, Vol. 19, (1996).
5. Tamura M., Yamada K., Shimizu M. and Kunio T., "On the relationship between threshold behavior of micro-crack and endurance limit of pearlitic-ferritic steel", *Transactions of the JSME*, Vol. 49, pp. 1378-1387, (1983).
6. Hussain, K., and De Los Rios R, R., "Microstructural effect on tensile and fatigue behavior of C–Mn steel", *J. Mater. Sci.*, Vol. 32, pp. 3565-3569, (1997).
7. Bonnen, J.J.F., and Topper, T. H., "The effect of bending overloads on torsional fatigue in normalized SAE 1045 steel", *Int. J. of Fatigue*, Vol. 21, pp. 23–33, (1999).
8. Tokaji, K., Ogama T., and Osako, S., "The growth of microstructurally small fatigue cracks in a ferritic-pearlitic steel", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 11 No. 5, pp. 331-342, (1988).
9. Zettl, B., Mayer, H., Ede, C. and Stanzl-Tschegg, S., "Very high cycle fatigue of normalized carbon steels", *Int. J. Fatigue*, Vol. 28, pp. 1583–1589, (2006).
10. De Los Rios, E. R., Tang, Z. and Miller, K,J., "Short crack fatigue behavior in a medium carbon steel", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 7 No. 2, pp. 97-108, (1984).
11. S. Suresh, *Fatigue of materials (2nd ed.)*, Cambridge University Press, Cambridge, (1998).

12. R. W. Hertzberg: *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials (4th ed.)* Wiley, (1989).
13. Box, G. E. P., Hunter, W. G., and Hunter, J. S., *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*, John Wiley and Sons, (1978).